

다목적 가속기용 대전류, 저에미턴스 양성자 이온원 개발 연구

홍인석, 엄규섭, 황용석
한국과학기술원
대전시 유성구 구성동 373-1

조용섭, 강상신, 정기석, 최병호
원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

다목적 양성자 가속기(KOrea Multi-purpose Accelerator Complex; KOMAC)를 위한 Duoplasmatron이온원이 설계 및 제작되었다. 빔인출을 위한 60kV 고전압시스템의 테스트가 수행되었으며 50kV인출전압에서 20mA의 수소 빔을 인출 할수 있었다. 이 이온원은 30kV 인출전압에서 20mA이상의 빔전류와 90% 빔전류에서 0.5π mm mrad정도의 낮은 수준의 빔에미턴스와 약 50% 양성자분율을 얻었다. 고밀도 고주파 플라즈마 원(예를들어 헬리콘와 Transformer coupled plasma;TCP 플라즈마원)이 양성자 및 수소 음이온원으로의 유용성에 대한 연구가 진행중이다.

1. 서론

현재 핵종변환기술 개발을 위한 KOMAC 프로그램이 한국원자력연구소에 의해 수행되고 있다.[1,2] KOMAC에 의해 제안된 다목적 양성자 가속기는 양성자 뿐만 아니라 음수소이온 빔도 인출이 가능하며 대전류, 저에미턴스, CW운전이 가능하도록 설계되어 있으며 설계에 적합한 이온원이 요구된다. 예를들어 1GeV, 20mA양성자 빔에 대해서는 인출전압이 50kV일 때 적어도 30mA이상의 빔전류가 필요하게 된다. 아울러 가속기 이온원의 다음단인 Radiofrequency quadrupole(RFQ)에 의해 요구되는 빔에미턴스는 1π mm mrad이하로 유지해야 한다.

대전류 양성자 가속기용 이온원으로는 주로 아크형태의 이온원, 고주파를 이용한 이온원, 마이크로 파를 이용한 플라즈마 이온원 등이 이용될 수 있으리라 기대되며 운전모드와 가속 이온종류에 따라 용도에 적합한 이온원이 선택되어야 한다. 펄스형 이온원으로 아크방전을 이용한 Duoplasmatron, 연속운전을 위한 대전류 이온원으로 마이크로파 방전을 이용한 Electron Cyclotron Resonance(ECR)이온원이 개발되어 이용되고 있으며. 음이온원으로는 Multicusp형의 구속장장을 갖는 고주파 이온원이 주로 이용된다.[3,4,5]

본 연구에서는 KOMAC의 모형 이온원으로 50kV인출전압에서 30mA이상 대전류 양성자 빔인출이 가능한 Duoplasmatron이온원을 제작하고 인출빔 특성시험 통해 설계요건을 도달

여부를 확인한다. 더불어 고주파 플라즈마 원(헬리콘이나 TCP)의 KOMAC이온원으로서의 가능성을 논의한다.[6,7]

2. 실험준비

2.1 Duoplasmatron 이온원

Duoplasmatron 이온원은 음전극, 중간전극, 양극으로 구성되어 있으며 음전극과 양극사이의 아크방전을 이용하여 고밀도 플라즈마를 발생한다. 본 이온원의 특징으로는 아크방전 플라즈마 발생 효율을 높이기 위해 중간전극과 양극사이에 비균질 고자장을 인가하여 음전극에서 발생된 전자를 집속, 집속된 전자가 보다 효과적으로 양극과 아크방전이 가능하도록 하였다. 음전극 재료로는 고온에서 안정적으로 열전자 방출이 가능한 텅스텐 필라멘트가 이용되었다. 아크전류가 증가할수록 플라즈마 밀도 및 온도가 증가하여 인출 빔전류 뿐만 아니라 양성자분율도 올릴수 있으나 아크 전류는 냉각능력, 아크전원, 필라멘트 수명 등에 의해 제한되므로 10A내외의 아크전류에서 이온원이 운전되고 있다. 솔레노이드 코일에 의해 인가된 자장은 4kG수준까지 측정되었으며 위치에 따른 자장세기는 그림2에서 볼수 있다. 측정된 자장의 특징은 아크방전부에서는 고밀도 플라즈마 발생을 위한 고자장영역이 존재하고 중간전극재료를 철을 사용하여 전자들의 수송을 위한 자기력선 형태를 구성하였다. 전극인출부에서의 자장 영향을 줄이기 위해 빔 인출전극 앞단에 자장 차폐체를 두었다.

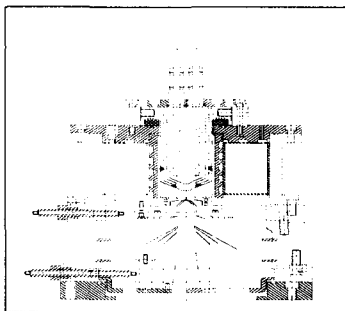


그림 1 Duoplasmatron 개략도

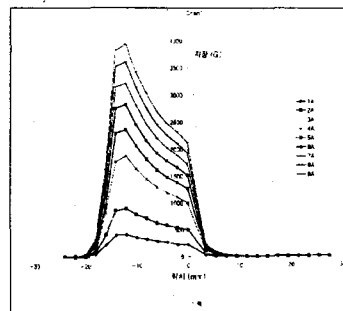


그림 2 이온원내 측정 자장세기

2.2 빔인출 시스템

빔인출계통은 가속-감속 인출전극을 구성하는 3전극 시스템에 빔 집속 전극을 추가하여 50kV까지 가속된 인출빔형태 가지고 빔전류는 30mA 이상이 되도록 설계하였다. 충분한 빔전류 인출을 위해 빔 반경은 16mm, 가속전극과 감속전극간의 14mm 전극의 기하학적 모양은 Quasi-pierce형태로 제작, 조립하였다. 거리는 양극의 전단부에 플라즈마 확장점을 놓아 고밀도 플라즈마 경계면을 조절하여 빔발산을 막을 수 있었다. 빔인출 구조는 양이온 인출을 위한 IGUN 코드를 사용하여 시뮬레이션 하였다.[8] 계산된 빔의 특성은 50kV인출 전압에서 50mA의 빔전류 인출이 가능함을 보였으며 빔모양은 그림 3에서 볼 수 있다. 인출 빔이 없을 때 60kV 수준의 전압에도 아크발생을 막기 위한 고전압 전원 및 인출 시스템을 제작하였으며 플라즈마 발생을 위한 필라멘트, 아크, 전자석 등의 전원은 고전압격리 변압기에

의해 접지와 격리되어 있으며 50kV 인출전압에서 20mA의 수소이온빔을 인출할 수 있었다.

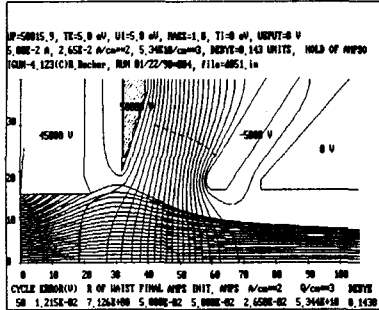


그림3 IGUN 시뮬레이션을 통한 빔profile

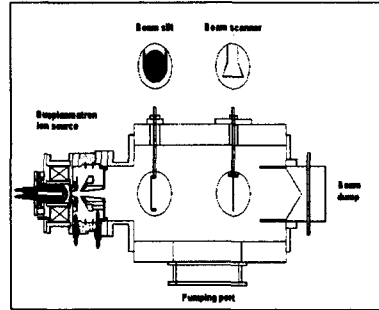


그림 4 빔 측정 장비 개략도

2.3 빔 측정장치

인출 양성자 빔은 수십mA가 되어 빔 에미턴스를 multi-slit 과 scanning probe가 각각 양극으로부터 20cm와 50cm에 위치 하였다. 슬릿을 통과한 빔은 뒷부분의 scanner에 의해 측정된다. multi-slit은 열소산 문제를 해결하기 위해 강제 수냉각하였다.

이온빔의 성분 측정을 위해 빔편향 영구자석을 두었으며 자속밀도는 500G를 사용하였으며 영구자석을 통과하여 편향된 수소빔은 scanner에 의해 측정된다..

3. 측정 결과 및 이온원 성능

KOMAC선형 가속기 이온원은 30kV에서 20mA이상의 빔전류를 얻을 수있었으며 이때의 빔 에미턴스는 90% 빔전류에서 계산할 때 0.5π mm mrad이하로 낮은 수준을 유지하고 있었다.(그림5) 편향 자석에 의해 편향된 수소빔을 측정한 결과 양성자 분율은 약 50%로 낮았다.(그림6)

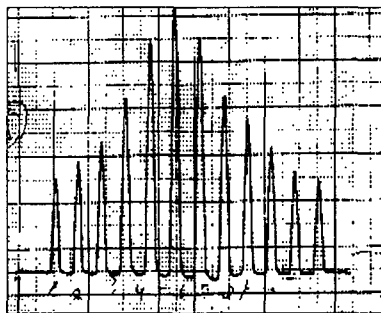


그림 5 측정된 빔에미턴스

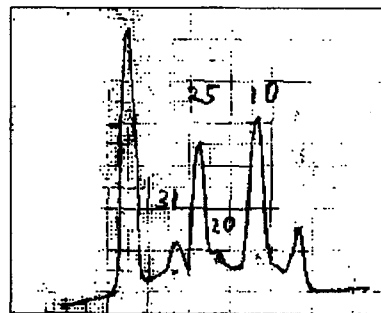


그림 6 양성자 빔 분율 측정 결과

4. KOMAC을 위한 고주파 이온원 개발제안

Duoplasmatron이온원의 경우 KOMAC에서 요구하는 설계요건에는 상당한 수준으로 근접 하였지만 양성자 분율 특성은 목표치에는 아직까지 도달하지 못하였으므로 고주파 및 초고

주파 플라즈마 발생방법을 이용한 이온원의 가능성이 고려되고 있다. 초고주파를 이용한 플라즈마의 경우 반도체 공정 등에 널리 이용되고 있는 ECR플라즈마가 대전류 가속기 이온원으로 이미 개발되어 있다. ECR플라즈마의 경우 비교적 시스템이 간편하고 연속운전이 가능한 장점을 가지고 있다. 최근에는 고주파를 이용하여 고밀도 플라즈마를 발생시킬 수 있는 헬리콘플라즈마원(그림7)이 대전류 이온원으로 개발이 진행 중이며 헬리콘 플라즈마의 경우는 ECR플라즈마에 비해 저주파, 낮은 자장에서도 훨씬 높은 플라즈마밀도를 가지는 이점으로 인해 대전류, 저 에미턴스 가속기용 대체 이온원으로 가능성이 있다.[9]

KOMAC은 다목적 가속기로 양성자 뿐만 아니라 수소 음이온 인출을 요구하므로 음이온원 개발도 병행되고 있다. 고주파 안테나를 이용한 multi-cusp이온원이 대부분의 음이온원으로 이용되어 왔으나 ECR과 마찬가지로 반도체 공정용으로 개발된 Inductive coupled plasma를 이용한 TCP플라즈마원이 음이온원으로의 이점들을 갖는다. 그림 8에서 보듯이 TCP플라즈마원은 플라즈마 발생 용기 외부에 위치한 안테나 부근에 고밀도 플라즈마가 발생되므로 인출부에서 전자온도가 낮고 고밀도 플라즈마 발생부와 격리되어야 하는 음이온원 조건을 만족시키며 플라즈마 발생을 위한 외부인가장장이 없으므로 자장에 의한 전자 필터가 용이해진다. 이들 고주파 및 초고주파 이온원의 경우는 대부분 필라멘트나 고주파 안테나 등이 플라즈마와 직접 반응하는 오염원이 없을 뿐만 아니라 별도의 고주파로부터 고전압 격리변압기는 요구되지 않는다.

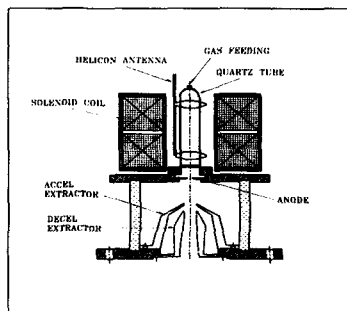


그림 7 헬리콘 이온원 개략도

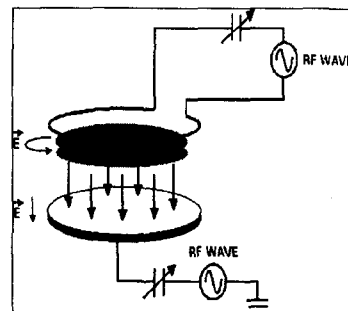


그림 8 TCP이온원

5. 결론

KOMAC선형가속기용 Duoplasmatron이온원이 제작되어 실험되어 왔다. 50kV이온빔 인출의 가능성 확인을 위해 60kV정도의 고전압에서 장비테스트를 수행하였다. 약 30kV의 인출 전압에서 20mA 이상의 수소빔 전류를 얻을 수 있었다. 이때의 빔 에미턴스는 90%빔전류 계산에서 0.5π mm mrad, 양성자 분율은 약 50%를 유지하였다. KOMAC 설계조건으로부터 RFQ가 요구하는 빔에미턴스는 만족한 반면 30mA수준의 양성자 빔을 인출하기 위한 양성자 분율은 낮았다. 빔전류와 양성자 분율의 설계조건을 만족하기 위한 이온원의 최적화가 계속되고 있으며 고밀도 고주파 및 초고주파 플라즈마 원이 대전류 이온원의 대안가능성으로 연구되고 있다. 헬리콘과 TCP가 각각 양성자로서의 개발 가능성을 보여주고 있다.

참고문헌

- [1] 원자력 산업용 가속기 개발계획(안) 수립 및 기본 설계 연구, 397-433, KAERI/RR-1769/96
- [2] C.K. Park, et al., in this conference.
- [3] Bernhard Wolf, Ion sources, 23-330, 1995
- [4] J. Sherman, et al., in the proceedings of 7th International conference on Ion Sources, Taormina, Italy, 1997.
- [5] K. Leung, in the proceedings of 7th International conference on Ion Sources, Taormina, Italy, 1997.
- [6] R.W. Boswell and D. Henry, Appl. Phys. Lett. 47(1985)1095.
- [7] J.I. Hopwood, Plasma Sources and Technol. 1(1992)109.
- [8] R. Becker and W.B. Herrmannsfeldt, Rev. Sci. Instrum. 63(1992)2756.
- [9] Y.S. Hwang, I.S. Hong, and G.S. Eom, Rev. Sci. Instrum. 69(1998)1344